



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 44 25 924 A 1

51 Int. Cl.⁸:
B 25 J 5/00
B 25 J 13/08
G 05 D 3/12

21 Aktenzeichen: P 44 25 924.7
22 Anmeldetag: 21. 7. 94
43 Offenlegungstag: 25. 1. 96

DE 44 25 924 A 1

71 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

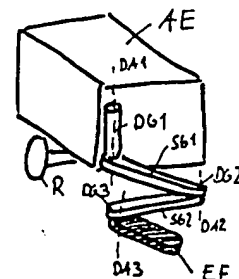
72 Erfinder:
Neubauer, Werner, Dipl.-Ing., 81547 München, DE;
Feiten, Wendelin, Dr., 85579 Neubiberg, DE;
Minekime, Christopher, Cambridge, Mass., US

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

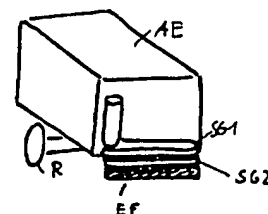
54 Autonome mobile Einheit mit raumsparendem Manipulator und zugehöriges Steuerungsverfahren

57 Mit der Erfindung wird eine autonome mobile Einheit vorgestellt, die einen zusammenfaltbaren Manipulatorarm besitzt, dessen Ende als Effektor, beispielsweise eine Saugdüse oder ein Pinsel ausgebildet ist. Der Arm ist dabei drehbar an der autonomen mobilen Einheit befestigt und kann eine Fläche überstreichen. Er besteht aus mehreren Segmenten, die an ihren Enden drehbar miteinander verbunden sind. Die jeweiligen Drehwinkel können unabhängig voneinander eingestellt werden. So ist es möglich, eine hohe Flexibilität bei der Bewegung des Armes zu erreichen. Das Steuerungsverfahren gibt einen vorteilhaften Algorithmus an, mit dem die Einheit und der Manipulatorarm gesteuert werden können. Es wird eine Hybridvariante favorisiert, bei der der Effektor mit einer Andruckkraft, die durch einen Kraftsensor gemessen wird, an eine Wand gedrückt wird und dabei die Einheit dem Effektor folgt. Einsatzbereiche sind beispielsweise Industriestaubsauger, autonome Roboter die Wände anstreichen sollen oder postaustragende Fahrzeuge.

a)



b)



BEST AVAILABLE COPY

DE 44 25 924 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 11. 95 508 064/287

14/29

Beschreibung

Der Trend in der technischen Entwicklung geht dahin, regelmäßig wiederkehrende Tätigkeiten von Maschinen ausführen zu lassen. Es wird weiter versucht, auch Tätigkeiten die eine gewisse Mobilität erfordern von Maschinen verrichten zu lassen. Beispiele für solche Tätigkeiten sind das Austragen von Post, Reinigungstätigkeiten, oder das Füllen von Flächen mit Farbe. Für diese Verrichtungen werden häufig autonome mobile Einheiten eingesetzt. Diese müssen sich dabei in unstrukturierten mit Hindernissen versehenen Umgebungen bewegen. Dazu benötigen sie geeignete Orientierungsverfahren und Sensoren, mit denen sie in ihrer Umgebung in Wechselwirkungen treten können. Von W.D. Rencken wurde mit dem Artikel "Concurrent Localization and Mapbuilding for mobile Robots using Ultrasonics-Sensors" zu, PROC. 1993 IEEE/RSJ. International Conference on Intelligence Robots and Systems, Yokohama, Jap. 26.-30. Juli 1993, Seite 2192 bis 2197 ein Verfahren vorgestellt, welches sich mit der Orientierung und Wegfindung in unbekannten Umgebungen befaßt und dafür eine Lösung aufzeigt. Ein weiteres Problem solcher autonomen mobilen Einheiten besteht darin, daß diese einen einfachen platzsparenden Manipulator besitzen müssen um die entsprechenden Tätigkeiten verrichten zu können. Hierzu ist keinerlei Stand der Technik bekannt.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht deshalb darin, eine autonome mobile Einheit anzugeben, die einen Manipulator besitzt, der eine große Reichweite innerhalb der Fläche besitzt, auf der sich die Einheit bewegt und der die Einheit nicht bei ihrer Bewegung behindert. Weiterhin soll für die Einheit und den Manipulator ein geeignetes Steuerungsverfahren angegeben werden.

Für die Einheit und den Manipulator wird diese Aufgabe gemäß den Merkmalen des Patentanspruches 1 gelöst. Für das Steuerungsverfahren wird die Aufgabe gemäß den Merkmalen des Patentanspruches 11 gelöst.

Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Ein großer Vorteil der erfindungsgemäßen Einheit besteht darin, daß sie durch einen Manipulatorarm nicht an der Bewegung in komplexen Umgebungen gehindert wird und dabei der Manipulator sehr kompakt ist im Vergleich zu seiner Reichweite. Vorteilhaft kommen dabei im eingezogenen Zustand die einzelnen Segmente des Manipulators übereinander zu liegen und schließen mit der Kontur der autonomen mobilen Einheit ab, so daß deren Grundfläche durch den Manipulator nur unwesentlich vergrößert wird.

Vorteilhaft lassen sich die einzelnen Segmente des Manipulators durch Seilzüge, welche über Umlenkrollen geführt sind, betätigen. Diese Ausführungsform kommt besonders einer Anwendung im Konsumentenbereich zugute, da sie technisch nicht sehr aufwendig und in der Praxis vielfältig erprobt ist.

Vorteilhafterweise sind in den einzelnen Drehgelenken des Manipulatorarmes Stellmotoren vorgesehen, welche unabhängig voneinander das jeweilige Segment in eine von der Steuerung vorgegebene Drehlage bringen können. Durch eine gezielte und direkte Beeinflussung der einzelnen Manipulatorsegmente kann flexibel und schnell auf sich ändernde Umgebungsbedingungen reagiert werden.

Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Einheit besteht darin, daß der Manipulatorarm innen hohl ausgebildet ist, und daß die einzelnen Segmente druckdicht miteinander abschließen. So kann beispielsweise Farbe aufgebracht werden oder es kann durch einen Unterdruck Schmutz von Flächen abgesaugt werden.

Ein weiterer Vorteil wird bei der erfindungsgemäßen Einheit dadurch erzielt, daß das letzte Segment des Manipulatorarmes als Effektor ausgebildet ist. So kann beispielsweise ein Pinsel oder eine Saugdüse direkt gesteuert werden und exakt nach Vorgabe der Steuerung in der Umgebung positioniert werden, um beispielsweise einer Wand zu folgen, oder ein vordefiniertes Bewegungsmuster abzuarbeiten.

Vorteilhaft ist ein solcher Effektor einer autonomen mobilen Einheit mit einem Sensor ausgestattet der auf Hindernisse reagiert. So läßt sich auf einfache Weise der Effektor entlang einer Wand führen. Bildet man diesen Sensor vorteilhaft als Kraftmeßfühler aus, so kann zusätzlich ein entsprechendes Moment von der Steuerung vorgegeben werden mit dem eine Anpreßkraft des Effektors an beispielsweise eine Wand erzielt werden kann.

Vorteilhaft ist dieser Kraftsensor als Rad ausgebildet, das mit einer Achse auf dem Effektor befestigt ist, wobei an der Achse Dehnmeßstreifen angebracht sind, mit welchen der Kraftvektor bestimmt werden kann. Durch das Rad wird zuverlässig vermieden, daß Reibungseinflüsse die Steuervorgänge verfälschen können.

Vorteilhaft wird die erfindungsgemäße Einheit nach einem Steuerverfahren betrieben, welches die Bewegung der autonomen mobilen Einheit in der Umgebung und des Effektors, welcher an einem Gehäusepunkt an der Einheit angebracht ist, berücksichtigt. So kann vorteilhaft in jenen Teilen der Umgebung, die nicht mit Hindernissen verstellt sind, der Effektor an der Einheit angelegt werden und in anderen Teilen der Umgebung, die es erforderlich machen, der Effektor ausgefahren werden und unterhalb von Gegenständen der Umgebung operieren. Weiterhin ist im erfindungsgemäßen Verfahren vorteilhaft vorgesehen, daß der Effektor nie in eine singuläre Position gerät von der aus er nicht mehr operieren kann. D. h. für den Fall, daß er zu nah an der Einheit anliegt, wird diese in ihrer Bewegung abgestoppt, bzw. für den Fall, daß eine vollständige Streckung des Manipulators droht wird die Einheit hinter dem Effektor hergeführt um den Manipulator wieder einzuknicken. Vorteilhaft ist es vorgesehen, den Effektor mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hybrid zu steuern, d. h. in eine Koordinatenrichtung wird eine Kraft aufgebracht, welche durch den Kraftmeßfühler bestimmt wird und in die andere Richtung wird durch die Steuerung eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben und eingehalten.

Im folgenden wird die Erfindung anhand von Figuren weiter erläutert.

Fig. 1a und b zeigen ein globales bzw. ein lokales Koordinatensystem des Manipulators bzw. des Effektors.

Fig. 2a und b zeigen Beispiele für die Regelung des Effektors, einmal für den Fall das freie Fahrt stattfindet und zum anderen Mal für den Fall, das der Effektor einer Wand folgen soll.

Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Effektors mit einem Kraftsensor.

Fig. 4a und b zeigen eine erfindungsgemäße autonome mobile Einheit einmal mit einem ausgefahrenen und das andere Mal mit einem eingefahrenen Manipulatorarm.

Fig. 1a zeigt ein Koordinatensystem das sinnvollerweise für die Modellierung des Manipulatorarmes in der

Steuereinheit der mobilen Einheit verwendet wird. Im Punkt A ist der Manipulator an der autonomen mobilen Einheit befestigt und drehbar gelagert. Zur Vereinfachung der Steuervorgänge wird in diesem Punkt ein Geschwindigkeitsvektor \vec{v} vorgegeben. Die Lage der einzelnen Segmente SG1 bis SG3 läßt sich dann durch die einzelnen Winkel Φ_1 , Φ_2 und Φ_3 , welche die jeweiligen Armsegmente miteinander bilden, beschreiben. Das Segment SG3 kann beispielsweise auch als Effektor ausgeführt sein. Mit diesem Effektor kann die autonome mobile Einheit beispielsweise Post austragen, Wände bemalen, Staubsaugen, oder ähnliche Verrichtungen durchführen. Für die Modellierung des Manipulatorarms wird vorteilhafter Weise davon ausgegangen, daß die Dynamik des Armes keine Auswirkungen auf die Dynamik der autonomen mobilen Einheit hat. Diese Annahme wurde gemacht, da sie sonst ein System mit sechs Allgemeinen Variablen ergeben würde, welches sechs Differentialgleichungen zweiter Ordnung zur Folge hätte. Ein solches Gleichungssystem ist schwierig lösbar. Im Formelteil sind in Gleichung 9 die Allgemeinkoordinaten in Gleichung 10 die verallgemeinerten Kräfte und in Gleichung 11 die kinetischen Energien angegeben. Aus diesen Energien ergibt sich die Gesamtenergie des Systems zur Gleichung 12 und die potentielle Energie aus Gleichung 13. Zur weiteren Herleitung der Zusammenhänge werden die Gleichungen 12 und 13 in die Gleichung 8 eingefügt, welche dann in Verbindung mit den Gleichungen 9 und 10 in die Gleichung 7 eingesetzt wird, um die Differentialgleichungen zweiter Ordnung zu erhalten.

Experimentell wurde verifiziert, daß diese Differentialgleichungen zweiter Ordnung sehr schwer zu lösen sind, da die Rechenkapazität der heutigen Steuerungsrechner nicht ausreicht, um dies in einer akzeptablen Zeit zu bewerkstelligen. Ein Maß für diese Zeit ist beispielsweise die erforderliche Reaktionszeit der Einheit, oder die minimale Zykluszeit, mit der die Steuerung der Einheit arbeitet. Aus diesen Gründen wurde die oben gewählte Einschränkung bezüglich der Dynamik gemacht.

Das in Fig. 1a dargestellte Modell des Manipulatorarmes läßt sich einfacher berechnen. Die verallgemeinerten Koordinaten sind in Gleichung 14 und die verallgemeinerten Kräfte in Gleichung 15 angegeben. Die kinetischen Energien ergeben sich aus Gleichung 16 und die kinetische Energie des Systems wird in Gleichung 17 dargestellt. Die potentielle Energie des Systems wird mit Gleichung 18 beschrieben. Bei diesem Lösungsansatz wurde die Annahme gemacht, daß der Punkt A in dem der Manipulatorarm befestigt ist, eine Position und eine Geschwindigkeit und eine Beschleunigung aufweist. Damit wird eine Bewegung bzw. eine Beschleunigung oder Verzögerung der mobilen Einheit an der der Arm befestigt ist, beschrieben. Zur Lösung der Differentialgleichung werden die Gleichungen 17 und 18 in die Gleichung 8 eingesetzt. Zusammen mit den Gleichungen 14 und 15 werden sie dann in die Gleichung 7 eingesetzt, um die Differentialgleichungen zweiter Ordnungen zu erhalten. Aus dieser Vorgehensweise ergeben sich drei Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Zur Bewegungssteuerung des Armes müssen diese drei Differentialgleichungen simultan für die zweiten Ableitungen der verallgemeinerten Koordinaten gelöst werden. Die Lösung dafür wird mit Hilfe der linearen Algebra gefunden. Gleichung 19 repräsentiert dabei die Form der Gleichungen, welche man aus der Lagrange'schen Dynamik erhält. Zur Lösung dieser Gleichung muß die Matrix M und der Vektor N entwickelt werden. Die Variable β ist der Vektor der zweiten Ableitung der verallgemeinerten Variablen. Die allgemeine Form ist in Gleichung 20 und die speziellen Werte für dieses System sind in Gleichung 21 angegeben. Die Matrix M ist in Gleichung 22 und der Vektor N in Gleichung 23 dargestellt. Aus der Lösung der Gleichung 19 für \ddot{x} ergeben sich die Differentialgleichungen, die in den Formeln 25 bis 27 dargestellt sind. Jede Gleichung wird durch denselben Faktor D dividiert, welcher die Determinante der Matrix M darstellt und in Gleichung 24 angegeben ist. Mit diesem speziellen Lösungsbeispiel ist es möglich, die Bewegungen des Manipulators und des angebrachten Effektors mit akzeptablen Zeitverhalten zu berechnen.

Fig. 1b zeigt den Effektor EF, welcher an einem Segment des Manipulatorarmes SG eingebracht ist. Für diesen Effektor wird vorzugsweise ein lokales Koordinatensystem Y_i und X_i verwendet. Dieses Koordinatensystem bildet mit den globalen Koordinaten den Winkel Φ_i . Bei der Bewegungssteuerung des Effektors wird vorteilhafterweise der Einfluß des Fahrzeuges, dessen Wechselwirkung mit dem Arm und die Wechselwirkung des Effektors mit dem Arm berücksichtigt. Der Arm fungiert dabei als Bindeglied zwischen dem Fahrzeug und dem Effektor EF. Zur Manipulatorsteuerung kann beispielsweise die Position des Armes kontrolliert werden. Das bedeutet, daß mit dem Effektor des Armes eine bestimmte Zielposition angesteuert werden soll. Diese Position wird dabei in kartesischen Koordinaten als Winkel des Effektors mit dem globalen Koordinatensystem beschrieben, wobei daraus die einzelnen Winkel zwischen den unterschiedlichen Segmenten des Armes berechnet werden können. Die Zielposition wird dabei in kartesischen Koordinaten des Effektors EF angegeben. Daraus lassen sich die einzelnen Winkelpositionen der unterschiedlichen Segmente berechnen. Aus denen wiederum lassen sich die einzelnen Drehmomente ableiten, welche für Antriebsmotoren gelten müssen, die an den einzelnen Gelenken zwischen den jeweiligen Segmenten des Manipulatorarmes angebracht sind. K1 und K2 sind dabei Kontrollparameter; die resultierende Gleichung ist in Gleichung 1 des Formelteiles angegeben. Dabei bedeutet der Index i die Nummer des Segmentes, wobei das Segment 1 direkt mit der autonomen mobilen Einheit verbunden ist und der höchste Wert, beispielsweise 3 den Effektor bedeutet. Der Winkel Φ ist dabei in lokalen Koordinaten angegeben. Um ein geschmeidigeres Bewegungsverhalten des Manipulators zu erzielen, ist es jedoch vorteilhafter nicht die Position sondern die Geschwindigkeit des Effektors zu kontrollieren.

Fig. 2a zeigt ein regelungstechnisches Blockschaltbild für die Kontrolle der Geschwindigkeit des am Manipulator angebrachten Effektors EF. Die Kontrolle der Geschwindigkeit anstatt der Position des Effektors kann verwendet werden, um eine geschmeidigere Bewegungstrajektorie des Effektors zu erhalten. Den Angaben in Fig. 2a liegt wiederum das Koordinatensystem aus Fig. 1b zugrunde. Beispielsweise sind von einem Benutzer oder von der Steuereinheit die Geschwindigkeiten X_i , Y_i und Φ_i vorgebar. Aus diesen Geschwindigkeiten werden die Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Motoren, die an den Gelenken der Segmente des Manipulators angebracht sind, berechnet. Die dafür gültige Herleitung kann wiederum aus dem Formelteil entnommen werden. Am Effektor können drei unterschiedliche Geschwindigkeiten kontrolliert werden. Zum einen die

kartesischen Geschwindigkeiten \dot{x}_i und \dot{y}_i und die Winkelgeschwindigkeit des Effektors $\dot{\phi}_i$. Zur Steuerung der autonomen mobilen Einheit sollten die Geschwindigkeiten die von der Steuereinheit oder vom Benutzer vorgegeben wurden, verwendet werden, um die einzelnen Winkelgeschwindigkeiten der Gelenke zu bestimmen. Die Ableitung dieser einzelnen Winkelgeschwindigkeiten ist in den Gleichungen 28 bis 36 angegeben. Die für das Ausführungsbeispiel geltenden Herleitungen sind in den Gleichungen 37 und 38 und die resultierende Transformation in Gleichung 39 angegeben. Die einzelnen Motordrehmomente wurden dabei so gesteuert, wie sie in der Gleichung 2 angegeben sind. Dabei bedeuten die Konstanten K1 bis K3 die einzelnen Steuerparameter.

Das in Fig. 2a dargestellte regelungstechnische Blockschaltbild verdeutlicht die einzelnen Zusammenhänge. Die in Fig. 2a gezeigte Version der Geschwindigkeitsregelung kann verwendet werden, wenn sich die autonome mobile Einheit in einer Umgebung bewegt, die weitestgehend von Hindernissen frei ist. Für diesen Fall gilt, daß keine Wechselwirkungen wie Reitkräfte oder Impulse auf den Manipulator einwirken und so keine dadurch hervorgerufenen Schwingungen in der Steuerung des Armes auftreten können.

Fig. 2 zeigt ein beispielhaftes Blockschaltbild für die Regelung des Manipulators, wenn auf diesen eine Kraft von außen einwirkt. Diese Kraft kann beispielsweise mit einem Kraftmeßfühler, welcher an dem Effektor angebracht ist, gemessen werden. Der Kraftwert wird beispielsweise an die Steuereinheit weitergeleitet und diese steuert die Motormomente dahingehend, daß diese Kraft bezüglich einer Umrandung beispielsweise einer Raumbegrenzung entlang deren sich der Roboter bewegen soll, konstant gehalten wird. Bei dieser vorteilhaften Steuerung der erfindungsgemäßen autonomen mobilen Einheit wird das Hybridprinzip verwendet. Dabei wird versucht in eine Richtung des lokalen Achsenkreuzes des Effektors beispielsweise der Y-Richtung den Effektor mit einer definierten Kraft gegen eine Wand des Raumes, in welchem sich die Einheit bewegt, zu pressen. Parallel zu der Wand, beispielsweise in X-Richtung wird eine bestimmte Geschwindigkeit der Einheit bzw. des Effektors eingehalten. Vorteilhaft kann bei der erfindungsgemäßen Ausführungsform auf eine Entkopplungsmatrix verzichtet werden. Die anzuwendende Kraft kann dabei beispielsweise von einem Benutzer in Abhängigkeit der vorliegenden Anwendung vorgegeben werden. Die Drehmomente zur Erzeugung der korrekten Winkelgeschwindigkeiten in den einzelnen Gelenken werden dabei berechnet, wie dies bei der Methode der Geschwindigkeitskontrolle geschah. Anschließend werden die jeweiligen Momente für die Geschwindigkeiten und die Kräfte addiert und gemeinsam damit die einzelnen Motoren angesteuert.

Bei der Steuerung ist insbesondere zu beachten, daß sowohl die Einheit als auch der Effektor unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen können. Die beiden unterschiedlichen Bewegungen werden dabei überlagert und müssen bei der Steuerung berücksichtigt werden. Das erfindungsgemäße Verfahren vermeidet dabei insbesondere Singularitäten des Systems. Das Steuerverfahren beruht dabei prinzipiell darauf, daß wenn der Arm einen singulären Punkt erreicht, das Fahrzeug versucht dem Arm zu folgen. Insbesondere kann dabei eine Sicherheitszone festgesetzt werden, mit der die Reichweite des Arms begrenzt wird. Beispielsweise kann sie so gewählt werden, daß falls der Arm 85% seiner Länge erreicht das Fahrzeug dem Arm folgt und somit verhindert, daß der Arm 100% seiner möglichen Strecklänge erreicht. Dasselbe kann beispielsweise für das innere Ende der Reichweite des Arms gelten. Beispielsweise kann falls der Arm 15% seiner totalen Strecklänge erreicht hat, das Fahrzeug so gesteuert werden, daß es sich vom Effektor wegbewegt. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird auf diese Weise ein reflexartiges Verhalten der autonomen mobilen Einheit erreicht. Der Vorgang des Anpressens des Effektors an eine Wand und der Vorfahrtsfahrt der Einheit läßt sich analog mit einem Menschen vergleichen, der seine Hand an eine Wand hält und dieser, allein durch Berührung, der Wand mit der Hand folgt.

Fig. 3 zeigt ein Beispiel eines Effektors der einen Kraftmeßfühler besitzt. Die Fig. 3a ist eine Draufsicht und in Fig. 3b ist eine Seitenansicht des Effektors gezeigt. Der Kraftmeßfühler besteht dabei aus einem Rad R, das an einer Achse AC drehbar gelagert ist. Weiter sind an der Achse AC Dehnmeßstreifen angebracht, mit denen ein Kraftvektor der auf das Rad einwirkt, bestimmt werden kann. Um ein Verkanten des Effektors in engen Raumbereichen zu vermeiden, sind an seinen äußeren Kanten Berührungssensoren BS angebracht. Mit diesen Berührungssensoren kann beispielsweise bei auftreten eines Hindernisses in einer Steuereinheit, in Abhängigkeit einer Bewegungstrajektorie des Effektors EF ein Ausweichmanöver eingeleitet werden.

Für das reflexartige Verhalten des Roboterarmes in Verbindung mit dem Effektor sind unterschiedliche Einflußfaktoren maßgeblich. Zum einen die Art des Berührungssensors zum zweiten die Lage des Berührungssensors am Effektor und zum dritten die Form des Effektors selbst. Die einfachste Form des Effektors besteht in einem Rechteck, an dessen Ecken Berührungssensoren angebracht sind. Eine weitere Ausführungsform eines Effektors besteht darin, daß das Rechteck beibehalten wird, jedoch eine Seite des Rechtecks mit der die Wand berührt wird, als Halbkreis ausgebildet wird, an welchem mehrere Berührungssensoren im gleichen Abstand angebracht werden. Bei der Berührung des Effektors mit einem Hindernis kann aus der Zahl und der Lage der Berührungssensoren, welche ein Signal abgeben, in einer Steuereinheit darauf geschlossen werden, wie ein geeignetes Ausweichmanöver, bzw. ein Steuermanöver um der Wand zu folgen, durchzuführen ist. Bei der Ausführungsform in Fig. 3 ist zu beachten, daß das Rad an welchen die Kraft gemessen wird, leicht über die Kontur des Effektors hinausragt.

Diese Ausführungsform besitzt einige Vorteile. Zum einen kann die Kraft, mit welcher der Effektor an die Wand drückt kontrolliert werden. Zum anderen kann der Effektor viel besser gesteuert werden, da der Kraftvektor auch eine Richtungsinformation bezüglich der Krafteinwirkung enthält. Als weiterer Vorteil wird die Reibung zwischen der Wand und dem Effektor vermindert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß mit dieser Ausführungsform nicht lediglich punktweise einzelne Signale geliefert werden, sondern daß einer Steuerungseinheit des Armes eine kontinuierliche Kraftinformation zur Verfügung gestellt wird und damit eine geschmeidigere Bewegung des Effektors erreichbar ist, als wenn einzelne Schalter betätigt oder nicht betätigt werden.

Bei der Steuerung des Armes und der Einheit kann durch die Aufnahme des Kraftvektors sichergestellt werden, daß der Effektor absolut senkrecht zur Wand steht. Zur Kontrolle des Effektors EF kann ein Kontrollvektor angegeben werden. Dieser Vektor ist in Gleichung 3 des Formelteiles dargestellt. Die ersten drei

Elemente repräsentieren dabei die zugewiesenen Geschwindigkeiten des Effektors. Die letzten drei Elemente repräsentieren die zugewiesenen Kräfte und Momente die am Effektor ausgeübt werden sollen. Für den Fall, daß nur der Kraftsensor in Kontakt mit der Wand kommt, reduziert sich der Kontrollvektor auf die Form, welche in Gleichung 4 angegeben ist. Dabei gilt zusätzlich Gleichung 5 und Gleichung 6. Der Vektor, der die Kraftrichtung angibt ist mit \vec{t} und der senkrecht darauf stehende Vektor ist mit \vec{n} bezeichnet. Hier wird beispielsweise, nachdem ein Wandkontakt hergestellt wurde, der Effektor mit einer Kraft von $K_3 = 5\text{N}$ an die Wand gepreßt. Gleichzeitig soll er sich mit einer Winkelgeschwindigkeit von $\dot{\Phi}_1$ (t_x) um den Mittelpunkt des Sensors drehen bis der Kraftvektor, der gemessen wird, senkrecht auf die Y-Achse des Effektors steht ($t_x = 0.0$). Dies wird dadurch erreicht, daß die Winkelgeschwindigkeit proportional zu t_x gemacht wird. Das bedeutet, daß, wenn diese Komponente gleich 0 ist, daß auch die Winkelgeschwindigkeit gleich 0 ist. Um $\dot{\Phi}_1$ schnell genug steuern zu können, muß eine bestimmte Funktion verwendet werden, um es zu berechnen. Diese Funktion ist in Gleichung 6 des Formelteiles dargestellt. Falls beispielsweise die Kraftkomponente in X-Richtung sich einen gewissen Bereich um 0 herum nähert, wird der Effektor durch die Steuereinheit in X-Richtung bewegt wie dies Gleichung 5 angibt. Dabei kann beispielsweise so vorgegangen werden, daß er sich ständig senkrecht zum gemessenen Kraftvektor bewegt. In vorteilhafter Weise wird durch dieses reflexartige Verhalten dem Effektor ein Navigieren auch um konvexe oder konkave Ecken herum ermöglicht.

Um die Differentialgleichungen des Manipulatorarmes herzuleiten, wurde die Lagrange'sche Dynamik verwendet. Die Gleichung dafür ist in Gleichung 7 des Formelteiles angegeben. Das L in der Gleichung repräsentiert die Lagrange'sche, welche in Gleichung 8 angegeben ist. Dabei ist mit T die Summe aus der kinetischen Energie der einzelnen Teile und mit V die Summe der Potentiellen Energie der Teile bezeichnet. Mit q_j werden die verallgemeinerten Variablen und mit Q_j werden die verallgemeinerten externen Kräfte bezeichnet. Die einzelnen verschiedenen Segmente des Armes haben dabei eine Masse, eine Trägheit und eine Länge. Diese werden hier beispielsweise mit m_1, m_2, m_3 , und I_1, I_2, I_3 und l_1, l_2, l_3 , beschrieben. Die Lagerreibungskoeffizienten der einzelnen Drehlager werden dabei mit B_1 bis B_3 bezeichnet. Jenes Armsegment, das am Roboter festgemacht ist, erhält die Nummer 1. In beiden Analysen wurden die lokalen Variablen Φ_1 bis Φ_3 in die globalen Variablen β_1 bis β_3 umgesetzt. Diese bedeuten dabei die jeweiligen Winkel, welche die einzelnen Armsegmente mit der globalen X-Achse bilden. Mit den Variablen X_1 bis X_3 und Y_1 bis Y_3 werden die Koordinaten der Schwerpunkte der einzelnen Armsegmente bezeichnet. Im einzelnen gelten in diesem Ausführungsbeispiel folgende physikalischen Parameter:

$$m_1 = 1\text{kg}$$

$$m_2 = 1\text{kg}$$

$$m_3 = 1\text{kg}$$

$$l_1 = 0.4\text{m}$$

$$l_2 = 0.4\text{m}$$

$$l_3 = 0.3\text{m}$$

$$I_1 = \frac{m_1 \omega_1^2 l_1^2}{12}$$

$$I_2 = \frac{m_2 \omega_2^2 l_2^2}{12}$$

$$I_3 = \frac{m_3 \omega_3^2 l_3^2}{12}$$

$$b_1 = 0.9 \frac{Ns}{m}$$

$$b_2 = 0.9 \frac{Ns}{m}$$

$$b_3 = 0.9 \frac{Ns}{m}$$

Fig. 4 zeigt ein Beispiel einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen autonomen mobilen Einheit. In Teil a ist diese Einheit mit dem ausgestreckten Manipulatorarm dargestellt. Die Einheit ist mit AE bezeichnet. Sie besitzt Räder R, mit denen sie sich fortbewegen kann, indem diese beispielsweise angetrieben werden. Der Manipulatorarm ist hier in drei Segmenten dargestellt, es können jedoch auch mehr oder weniger Segmente für seinen Aufbau verwendet werden. Die Berechnung der Kinematik gestaltet sich dann entsprechend aufwendiger oder weniger aufwendig. Das Armsegment SG1 ist in einem Drehlager DG1, welches eine Drehachse DA1 besitzt an der autonomen mobilen Einheit AE befestigt. An seinem Ende ist ein Segment SG2 in einem Drehlager DG2 mit einer Drehachse DA2 festgemacht. Als Segment 3 ist hier ein Effektor EF verwendet worden. Dieser Effektor ist mit einer Seite drehbar in einem Drehgelenk DG3 mit einer Drehachse DA3 an dem Armsegment SG2 befestigt.

Zu beachten ist hierbei, daß die einzelnen Achsen der jeweiligen Drehgelenke achsparallel sind und senkrecht auf den Untergrund stehen, auf dem sich die Einheit fortbewegt. In einzelnen Anwendungsfällen kann es auch sinnvoll sein, die Drehlage des Drehgelenks 1 anders als senkrecht zum Untergrund zu wählen. Beispielsweise wenn Wände bemalt werden sollen, kann es sinnvoll sein den Arm nach oben auszustrecken, d.h. den Arm seitlich um 90° gedreht an einer Seitenwand der Einheit anzubringen, um damit Wände von oben bis unten überstreichen zu können.

Fig. 4b zeigt eine erfindungsgemäße autonome mobile Einheit mit einem eingezogenen Manipulatorarm.

Dabei ist zu beachten, daß die Segmente SG2, SG1 und der Effektor übereinander zu liegen kommen. Durch diese vorteilhafte Ausführungsform des Manipulators wird vermieden, daß dieser im eingezogenen Zustand die Bewegungsfreiheit der Einheit beeinträchtigt. Deutlich ist zu erkennen, daß der eingezogene Manipulator unwesentlich über die Grundfläche der autonomen mobilen Einheit AE hinausragt.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Formteil

$$T_i = -k_1 \dot{\beta}_i + k_2 (\phi_{tar_i} - \phi_{actual_i}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= k_1 (\phi_{tar_1} - (\dot{\beta}_1 - \dot{\phi}_c)) \\ T_2 &= k_2 (\phi_{tar_2} - (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1)) \\ T_3 &= k_3 (\phi_{tar_3} - (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\vec{c} = \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \phi_f \\ F_{x_f} \\ F_{y_f} \\ T_{\phi_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{tar} \\ F_{applied} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{c} = \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \phi_f \\ F_{x_f} \\ F_{y_f} \\ T_{\phi_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 t_x r - \dot{x}_f (\Delta \phi) \\ 0.0 \\ \dot{\phi}_f(t_x) \\ -k_3 t_x \\ -k_3 t_y \\ -k_3 t_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\dot{x}_f(\Delta \phi) = \begin{cases} 0.0 & \text{if } t_x < -\Delta \phi \\ k_1 n_x \cos\left(\frac{t_x \pi}{2(\Delta \phi)}\right) & \text{if } -\Delta \phi \leq t_x \leq \Delta \phi \\ 0.0 & \text{if } t_x > \Delta \phi \end{cases} \quad (5)$$

$$\dot{\phi}_f(t_x) = \begin{cases} -k_4 & \text{if } k_2 t_x < -k_4 \\ k_2 t_x & \text{if } -k_4 \leq k_2 t_x \leq k_4 \\ k_4 & \text{if } k_2 t_x > k_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$k_1 = 0.5$$

$$k_2 = 10.0$$

$$k_3 = 5.0$$

$$\Delta \phi = 0.1 \text{ radians}$$

$$r = \text{Distance from center of end-effector to center of wheel}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j \quad (7)$$

$$L = T - V \quad (8)$$

$$q_j = \{X, Y, \Phi, \beta_1, \beta_2, \beta_3\} \quad (9)$$

$$Q_j = \{F_X, F_Y, \tau_{vehicle}, \tau_1 - b_1 \dot{\phi}_1, \tau_2 - b_2 \dot{\phi}_2, \tau_3 - b_3 \dot{\phi}_3\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_j = & \left\{ \frac{M \dot{X}^2}{2}, \frac{M \dot{Y}^2}{2}, \frac{I_M \dot{\Phi}^2}{2}, \frac{1}{2} [I_1 \dot{\beta}_1^2 + m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)], \right. \\ & \left. \frac{1}{2} [I_2 \dot{\beta}_2^2 + m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)], \frac{1}{2} [I_3 \dot{\beta}_3^2 + m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2)] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$T = \sum_{j=1}^6 T_j \quad (12)$$

$$V = 0 \quad (13)$$

$$q_j = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3\} \quad (14)$$

$$Q_j = \{\tau_1 - b_1 \dot{\phi}_1, \tau_2 - b_2 \dot{\phi}_2, \tau_3 - b_3 \dot{\phi}_3\} \quad (15)$$

$$T_j = \left\{ \frac{1}{2} [I_1 \dot{\beta}_1^2 + m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)], \frac{1}{2} [I_2 \dot{\beta}_2^2 + m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)], \frac{1}{2} [I_3 \dot{\beta}_3^2 + m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2)] \right\} \quad (16)$$

$$T = \sum_{j=1}^3 T_j \quad (17)$$

$$V = 0 \quad (18)$$

$$M\ddot{\beta} + N = 0 \quad (19)$$

$$\ddot{\beta} = M^{-1}(-N) \quad (20)$$

$$\ddot{\beta} = \begin{pmatrix} \ddot{\beta}_1 \\ \ddot{\beta}_2 \\ \ddot{\beta}_3 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$M = \begin{bmatrix} I_1 + I_1^2 \left(\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3 \right) & I_1 I_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \cos(\beta_1 - \beta_2) & \frac{I_1 I_2 m_3 \cos(\beta_1 - \beta_2)}{2} \\ I_1 I_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \cos(\beta_1 - \beta_2) & I_2 + I_2^2 \left(\frac{m_2}{4} + m_3 \right) & \frac{I_2 I_3 m_3 \cos(\beta_2 - \beta_3)}{2} \\ \frac{I_1 I_2 m_3 \cos(\beta_1 - \beta_2)}{2} & \frac{I_2 I_3 m_3 \cos(\beta_2 - \beta_3)}{2} & I_3 + \frac{I_3^2 m_3}{4} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$N = \begin{pmatrix} -I_1 \sin \beta_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) \ddot{x} + I_1 \cos \beta_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) \ddot{y} + b_1 \dot{\beta}_1 + \\ -I_2 \sin \beta_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \ddot{x} + I_2 \cos \beta_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \ddot{y} + \\ -\frac{I_1 I_2 m_3 \sin \beta_1}{2} \ddot{x} + \frac{I_1 I_2 m_3 \cos \beta_1}{2} \ddot{y} + \frac{I_1 I_2 m_3 \sin(\beta_1 - \beta_2)}{2} \dot{\beta}_1^2 + \\ I_1 I_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \sin(\beta_1 - \beta_2) \dot{\beta}_2^2 + \frac{I_1 I_2 m_3 \sin(\beta_1 - \beta_2)}{2} \dot{\beta}_3^2 - \tau_1 \\ I_1 I_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \sin(\beta_2 - \beta_1) \dot{\beta}_1^2 + b_2 \dot{\beta}_2 + \frac{I_2 I_3 m_3 \sin(\beta_2 - \beta_3)}{2} \dot{\beta}_3^2 - \tau_2 \\ \frac{I_2 I_3 m_3 \sin(\beta_2 - \beta_3)}{2} \dot{\beta}_2^2 + b_3 \dot{\beta}_3 - \tau_3 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$D = k_1 - k_2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2) - k_3 \cos^2(\beta_1 - \beta_3) - k_4 \cos^2(\beta_2 - \beta_3) + k_5 \cos(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_1 - \beta_3) \cos(\beta_2 - \beta_3) \quad (24)$$

$$k_1 = I_1 I_2 I_3 + \frac{I_1 I_2 I_3^2 m_3}{4} + I_1 I_3 I_2^2 \left(\frac{m_2}{4} + m_3 \right) + \frac{I_1 I_2^2 I_3^2 m_3 \left(\frac{m_1}{4} + m_3 \right)}{4} + I_2 I_3 I_1^2 \left(\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3 \right) +$$

$$\frac{I_2 I_1^2 I_3^2 m_3 \left(\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3 \right)}{4} + \left(I_3 I_1^2 I_2^2 + \frac{I_1^2 I_2^2 I_3^2 m_3}{4} \right)$$

$$\left(\frac{m_1 m_2}{16} + \frac{m_2^2}{4} + \frac{m_1 m_3}{4} + \frac{5 m_2 m_3}{4} + m_3^2 \right)$$

$$k_2 = I_1^2 I_2^2 \left(I_3 + \frac{I_3^2 m_3}{4} \right) \left(\frac{m_2^2}{4} + m_2 m_3 + m_3^2 \right)$$

$$\begin{aligned}
 k_3 &= \frac{l_1^2 l_3^2 m_3^2 (I_2 + l_2^2 (\frac{m_2}{4} + m_3))}{4} \\
 k_4 &= \frac{l_2^2 l_3^2 m_3^2 (I_1 + l_1^2 (\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3))}{4} \\
 k_5 &= \frac{l_1^2 l_2^2 l_3^2 m_3^2 (m_2 + 2 m_3)}{4}
 \end{aligned}$$

5

$$\begin{aligned}
 \ddot{\beta}_1 &= \frac{1}{D} [(-c_1 \cos(\beta_1 - \beta_3) + c_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_2 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_3 - b_3 (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2) - \frac{l_3 m_3}{2} (l_1 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) + l_2 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) - \ddot{x}_1 \sin \beta_3 + \ddot{y}_1 \cos \beta_3) \right) + \\
 &\quad (-c_3 \cos(\beta_1 - \beta_2) + c_4 \cos(\beta_1 - \beta_3) \cos(\beta_2 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_2 - b_2 (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1) - \frac{l_2 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_2 - \beta_3)}{2} - l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \right. \\
 &\quad \left. (l_1 \dot{\beta}_1^2 \sin(\beta_2 - \beta_1) - \ddot{x}_1 \sin \beta_2 + \ddot{y}_1 \cos \beta_2) \right) + \\
 &\quad (c_5 - c_6 \cos^2(\beta_2 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_1 - b_1 (\dot{\beta}_1 - \dot{\phi}_c) - l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_1 - \beta_3) - \frac{l_1 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_1 - \beta_3)}{2} + \right. \\
 &\quad \left. l_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) (\ddot{x}_1 \sin \beta_1 - \ddot{y}_1 \cos \beta_1) \right)] \quad (25)
 \end{aligned}$$

10

15

20

25

$$\begin{aligned}
 \ddot{\beta}_2 &= \frac{1}{D} [(-c_7 \cos(\beta_2 - \beta_3) + c_8 \cos(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_1 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_3 - b_3 (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2) - \frac{l_3 m_3}{2} (l_1 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) + l_2 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) - \ddot{x}_1 \sin \beta_3 + \ddot{y}_1 \cos \beta_3) \right) + \\
 &\quad (c_9 - c_{10} \cos^2(\beta_1 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_2 - b_2 (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1) - \frac{l_2 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_2 - \beta_3)}{2} - l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \right. \\
 &\quad \left. (l_1 \dot{\beta}_1^2 \sin(\beta_2 - \beta_1) - \ddot{x}_1 \sin \beta_2 + \ddot{y}_1 \cos \beta_2) \right) + \\
 &\quad (-c_3 \cos(\beta_1 - \beta_2) + c_4 \cos(\beta_1 - \beta_3) \cos(\beta_2 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_1 - b_1 (\dot{\beta}_1 - \dot{\phi}_c) - l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_1 - \beta_3) - \frac{l_1 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_1 - \beta_3)}{2} + \right. \\
 &\quad \left. l_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) (\ddot{x}_1 \sin \beta_1 - \ddot{y}_1 \cos \beta_1) \right)] \quad (26)
 \end{aligned}$$

30

35

40

45

$$\begin{aligned}
 \ddot{\beta}_3 &= \frac{1}{D} [(c_{11} - c_{12} \cos^2(\beta_1 - \beta_2)) \\
 &\quad \left(r_3 - b_3 (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2) - \frac{l_3 m_3}{2} (l_1 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) + l_2 \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_3 - \beta_2) - \ddot{x}_1 \sin \beta_3 + \ddot{y}_1 \cos \beta_3) \right) + \\
 &\quad (-c_7 \cos(\beta_2 - \beta_3) + c_8 \cos(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_1 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_2 - b_2 (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1) - \frac{l_2 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_2 - \beta_3)}{2} - l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \right. \\
 &\quad \left. (l_1 \dot{\beta}_1^2 \sin(\beta_2 - \beta_1) - \ddot{x}_1 \sin \beta_2 + \ddot{y}_1 \cos \beta_2) \right) + \\
 &\quad (-c_1 \cos(\beta_1 - \beta_3) + c_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) \cos(\beta_2 - \beta_3)) \\
 &\quad \left(r_1 - b_1 (\dot{\beta}_1 - \dot{\phi}_c) - l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \dot{\beta}_2^2 \sin(\beta_1 - \beta_3) - \frac{l_1 l_3 m_3 \dot{\beta}_3^2 \sin(\beta_1 - \beta_3)}{2} + \right. \\
 &\quad \left. l_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) (\ddot{x}_1 \sin \beta_1 - \ddot{y}_1 \cos \beta_1) \right)] \quad (27)
 \end{aligned}$$

50

55

60

65

$$c_1 = \frac{l_1 l_3 m_3 (I_2 + l_2^2 (\frac{m_2}{4} + m_3))}{2}$$

$$c_2 = \frac{l_1 l_2^2 l_3 m_3 (\frac{m_2}{2} + m_3)}{2}$$

$$c_3 = l_1 l_2 (\frac{m_2}{2} + m_3) (I_3 + \frac{l_3^2 m_3}{4})$$

$$c_4 = \frac{l_1 l_2 l_3^2 m_3^2}{4}$$

$$c_5 = I_2 I_3 + \frac{I_2 l_3^2 m_3}{4} + I_3 l_2^2 (\frac{m_2}{4} + m_3) + \frac{l_2^2 l_3^2 m_3 (\frac{m_2}{4} + m_3)}{4}$$

$$c_6 = \frac{l_2^2 l_3^2 m_3^2}{4}$$

$$c_7 = \frac{l_2 l_3 m_3 (I_1 + l_1^2 (\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3))}{2}$$

$$c_8 = \frac{l_1^2 l_2 l_3 m_3 (\frac{m_2}{2} + m_3)}{2}$$

$$c_9 = I_1 I_3 + \frac{I_1 l_3^2 m_3}{4}$$

$$c_{10} = \frac{l_1^2 l_3^2 m_3^2}{4}$$

$$c_{11} = I_1 I_2 + I_1 l_2^2 (\frac{m_2}{4} + m_3) + I_2 l_1^2 (\frac{m_1}{4} + m_2 + m_3) +$$

$$l_1^2 l_2^2 (\frac{m_1 m_2}{16} + \frac{m_2^2}{4} + \frac{m_1 m_3}{4} + \frac{5 m_2 m_3}{4} + m_3^2)$$

$$c_{12} = l_1^2 l_2^2 (\frac{m_2^2}{4} + m_2 m_3 + m_3^2)$$

$$\vec{x}_1 = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\vec{x}_2 = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ x_c \\ y_c \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$f_1(\vec{x}_1) = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\Delta \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \frac{df_1}{d\vec{x}_1} \Delta \vec{x}_1 \quad (31)$$

$$if \Delta = \frac{d}{dl} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \frac{df_1}{d\vec{x}_1} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \dot{\Phi}_f \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$f_2(\vec{x}_2) = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\Delta \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \frac{df_2}{d\vec{x}_2} \Delta \vec{x}_2 \quad (34)$$

$$if \Delta = \frac{d}{dt} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \frac{df_2}{d \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} + \frac{df_2}{d \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \Phi_c \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\Phi}_c \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \left[\frac{df_2}{d \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}} \right]^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} - \frac{df_2}{d \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \Phi_c \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\Phi}_c \end{bmatrix} \right) \quad (36)$$

$$f_1(\bar{x}_1) = \begin{bmatrix} x_f + \frac{l_3 \sin \Phi_f}{2} \\ y_f - \frac{l_3 \cos \Phi_f}{2} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$f_2(\bar{x}_2) = \begin{bmatrix} x_c + x_0 \cos \Phi_c - y_0 \sin \Phi_c + l_1 \cos(\Phi_c + \phi_1) + l_2 \cos(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2) \\ y_c + x_0 \sin \Phi_c + y_0 \cos \Phi_c + l_1 \sin(\Phi_c + \phi_1) + l_2 \sin(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2) \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)}{l_1 \sin \phi_2} & \frac{\sin(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)}{l_1 \sin \phi_2} \\ \frac{-l_1 \cos(\Phi_c + \phi_1) - l_2 \cos(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)}{l_1 l_2 \sin \phi_2} & \frac{-l_1 \sin(\Phi_c + \phi_1) - l_2 \sin(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)}{l_1 l_2 \sin \phi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f + \frac{l_3 \cos \Phi_f}{2} \dot{\phi}_f - \dot{x}_c - (-x_0 \sin \Phi_c - y_0 \cos \Phi_c - l_1 \sin(\Phi_c + \phi_1) - l_2 \sin(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)) \dot{\Phi}_c \\ \dot{y}_f + \frac{l_3 \sin \Phi_f}{2} \dot{\phi}_f - \dot{y}_c - (x_0 \cos \Phi_c - y_0 \sin \Phi_c + l_1 \cos(\Phi_c + \phi_1) + l_2 \cos(\Phi_c + \phi_1 + \phi_2)) \dot{\Phi}_c \end{bmatrix} \quad (39)$$

Patentansprüche

1. Autonome mobile Einheit mit Manipulator,
 - a) bei der eine Steuereinheit zur Steuerung von Bewegungen der Einheit und des Manipulators vorgesehen ist,
 - b) bei welcher der Manipulator um eine Drehachse drehbar gelagert an einer Gehäusebegrenzung der Einheit angebracht ist,
 - c) bei welcher der Manipulator, aus mindestens drei sich länglich erstreckenden Segmenten besteht, welche an ihren Enden drehbar über Drehlager miteinander verbunden sind, wobei die Drehlager jeweils eine Drehachse aufweisen,
 - d) bei der die Drehachsen näherungsweise zueinander achsparallel sind und im Wesentlichen senkrecht auf den Untergrund stehen, auf welchem sich die Einheit bewegt,
 - e) bei der Stellmittel vorgesehen sind, mit denen die einzelnen Segmente unabhängig voneinander in ihren Drehlagern verdrehbar sind,
 - f) bei der die Segmente so angeordnet sind, daß sie für den Fall in dem sie durch Verdrehung an der Gehäusebegrenzung zu liegen kommen, den Anlegezustand, übereinander zu liegen kommen,
 - g) und bei der die Länge und Breite der Segmente so bemessen ist, daß diese im Anlegezustand nicht, oder nur unwesentlich über die Grundfläche der Einheit hinausragen.
2. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 1, bei der als Stellmittel über Umlenkrollen geführte Seilzüge vorgesehen sind.
3. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 1, bei der als Stellmittel Motoren an den jeweiligen Drehgelenken vorgesehen sind.
4. Autonome mobile Einheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Segmente innen hohl und druckdicht miteinander verbunden sind.
5. Autonome mobile Einheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der das letzte Segment als Effektor ausgebildet ist.
6. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 5, bei der der Effektor als Saugdüse, oder Pinsel ausgebildet ist.
7. Autonome mobile Einheit nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei der das äußerste Segment mindestens einen Sensor zum Feststellen eines Hindernisses aufweist.
8. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 7, bei der als Sensor ein Berührungsschalter vorgesehen ist.
9. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 7, bei der als Sensor ein Kraftmeßfühler vorgesehen ist.
10. Autonome mobile Einheit nach Anspruch 9, bei der als Kraftmeßfühler ein Rad auf einer Achse vorgesehen ist, aus deren Verbiegung über Dehnmeßstreifen der Kraftvektor abgeleitet wird.
11. Steuerverfahren für eine autonome mobile Einheit mit einem um eine Drehachse drehbaren Manipulator aus mehreren, an ihren Enden über Drehlager mit einer Drehachse verbundenen Segmenten bei der alle Drehachsen des Manipulators näherungsweise achsparallel sind und im Wesentlichen senkrecht auf den Untergrund stehen, auf welchem sich die Einheit bewegt und die als äußerstes Segment einen Effektor mit Kraftmeßfühler besitzt,
 - a) bei dem falls der Effektor auf seinem Weg zu einem Ziel keiner Raumbegrenzung folgen soll, in

einem auf den Effektor bezogenen lokalen Koordinatensystem dessen Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und Drehrichtung vorgegeben werden, und daraus Antriebsmomente für an den Drehgelenken vorgesehene Motoren zum Verdrehen der Segmente abgeleitet werden, so daß für drei Segmente gilt:

$$T_1 = k_1 (\dot{\phi}_{\omega_1} - (\dot{\beta}_1 - \dot{\Phi}_e))$$

$$T_2 = k_2 (\dot{\phi}_{\omega_2} - (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1))$$

$$T_3 = k_3 (\dot{\phi}_{\omega_3} - (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2))$$

mit:

Index 1, 2, 3, Nummer des Segmentes von der Einheit aus gezählt

Index tar Zielpunktbezogen

T Antriebsdrehmoment

k Regelparameter

$\dot{\beta}$ zeitliche Ableitung einer globalen Variable

Φ Winkel zwischen den einzelnen Segmenten, für das erste mit der x-Achse

b) bei dem falls der Effektor einer Raumbegrenzung folgen soll über den Kraftmeßfühler die Andruckkraft zwischen der Raumbegrenzung und dem Effektor gemessen wird, wobei die Andruckkraft dadurch konstant gehalten wird, daß aus der Geometrie des Manipulators der aktuell gemessenen Andruckkraft und einer Soll-Andruckkraft ein Korrekturmoment ermittelt wird, welches zu dem unter a) gefundenen Moment nach Betrag und Richtung aufsummiert wird um die jeweiligen Antriebsmomente zu ermitteln,

c) und bei dem in Abhängigkeit einer aktuellen Strecklänge des Manipulators die Einheit in Bewegung versetzt, bzw. angehalten wird.

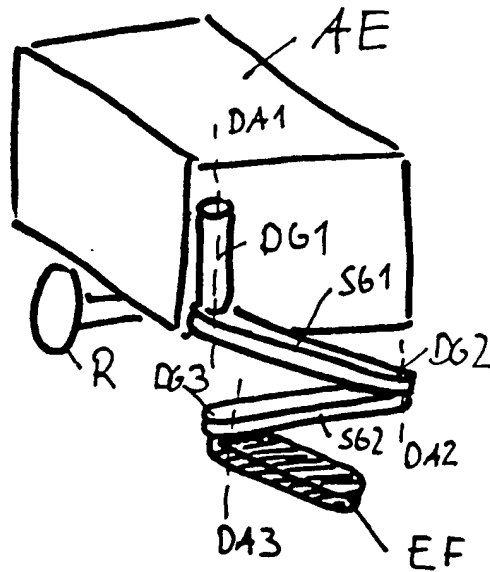
12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem als Streckfaktor das Verhältnis aus aktueller Strecklänge des Manipulators und möglicher Strecklänge des Manipulators gebildet wird, wobei bei Überschreiten eines ersten Grenzwert es für den Streckfaktor die Einheit in Richtung des Effektors bewegt wird und bei Unterschreiten eines zweiten Grenzwertes für den Streckfaktor die Einheit angehalten wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

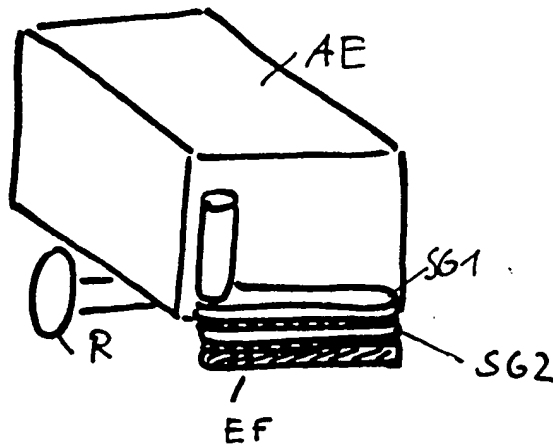
- Leerseite -

Figur 4 *

a)



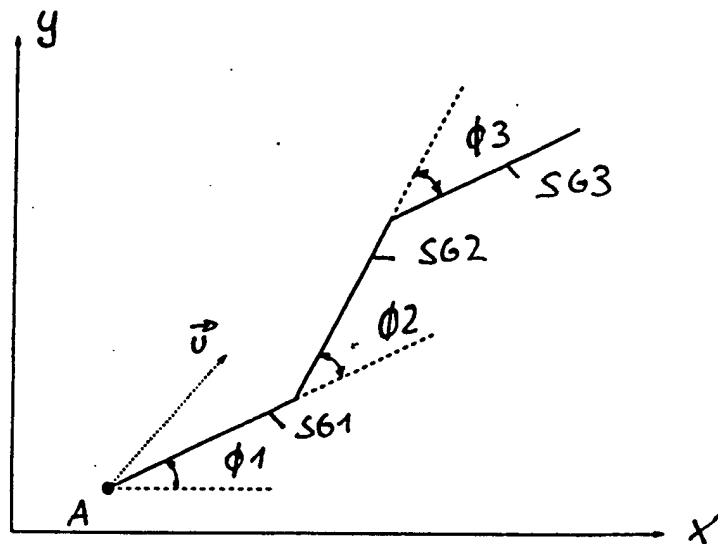
b)



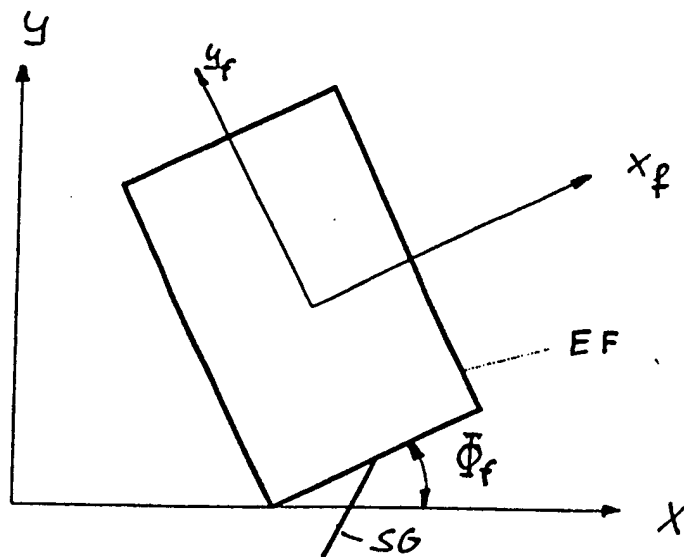
BEST AVAILABLE COPY

Figur 1

a)

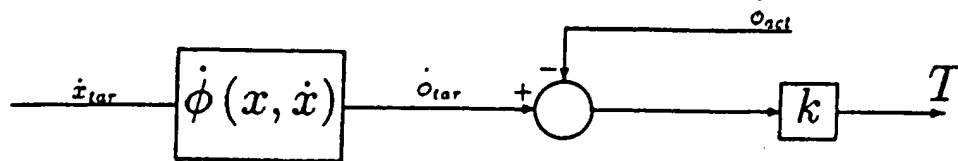


b)

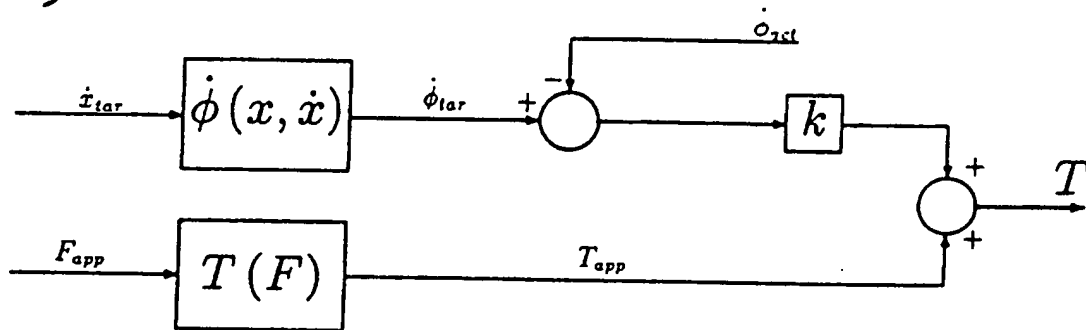


Figur 2

a)

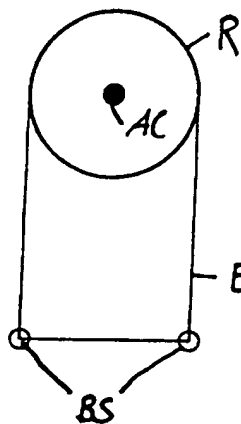


b)



Figur 3

a)



b)

